

«УТВЕРЖДАЮ»
Зам. директора ФГБУН ОИВТ РАН
/Гавриков А.В./
«18» 09 2021г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Стамова Любена Ивановича

на тему «Математическое моделирование неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Стамова Л.И. посвящена разработке математической модели и вычислительного комплекса для расчетно-теоретического анализа трехмерных реагирующих течений, а так же численному решению задачи о развитии процессов воспламенения, горения и детонации при отражении ударной волны от внутренней поверхности клина и конуса. В рамках диссертационной работы проведено всестороннее тестирование разработанного автором вычислительного комплекса, в том числе модулей реализации параллельных расчетов на многопроцессорных ЭВМ с использованием технологий параллельного программирования CUDA и OpenMP, что показало достаточно высокую эффективность разработанных автором программных модулей. С использованием разработанного вычислительного комплекса автором решена задача о воспламенении и формировании детонационных волн в водородно-воздушных смесях в результате фокусировки ударной волны при ее взаимодействии с клиновидной и конусовидной мишенью. Показано соответствие полученных расчетов экспериментальным данным, в том числе по возможным сценариям развития процесса, включая переход горения в детонацию. В результате проведенных исследований автором получен ряд новых результатов, имеющих научную и практическую ценность для развития и обеспечения безопасной работы технологий на основе водорода.

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 165 страницах, состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 7 таблиц, 60 рисунков, 164 библиографических ссылки.

Во введении сформулированы цель и задачи диссертации, обоснована их актуальность, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность, а так же достоверность полученных результатов. Здесь же автор формулирует положения, выносимые на защиту. Пред-

ставлены личный вклад автора и информация об апробации результатов диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы представлен обзор работ, посвященных исследованию процессов горения и детонации газообразных смесей, а так же моделям, используемым при численном моделировании динамических процессов в реагирующих газах.

Во второй главе подробно изложены элементы математической модели, включая традиционную модель газодинамики горения на основе законов сохранения, модели турбулентности, модель химической кинетики, начальные и граничные условия. Также в этой главе уделено внимание подробному описанию вычислительного алгоритма и его реализации.

Третья глава посвящена тестированию разработанного вычислительного комплекса на решении задач газодинамики нереагирующих и реагирующих сред. Отдельно стоит выделить раздел 3.4, где подробно описана реализация модулей вычислительного комплекса, осуществляющих параллельные расчеты на многопроцессорных системах, включающих в свой состав графические сопроцессоры. Проведенные и представленные в разделе тесты указывают на высокую эффективность разработанной автором параллельной реализации.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования процесса взаимодействия ударной волны с клинообразными и коническими мишенями, приводящего к генерации волн горения и детонации, распространяющихся в реагирующем газе (водородно-воздушной смеси). Представлена классификация сценариев развития процесса инициирования и развития волн горения в зависимости от интенсивности падающей ударной волны, включая сценарий с переходом горения в детонацию. Проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными и получено хорошее согласие результатов расчетов с данными натурного эксперимента.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **замечания**:

1) При обсуждении известных результатов по переходу горения в детонацию в рамках обзора литературы допущен ряд некорректных формулировок. В частности, когда автор противопоставляет механизму «взрыва во взрыве» А. Оппенгейма «другую точку зрения на природу перехода в детонацию» он говорит о механизме градиентного ускорения пламени Я.Б. Зельдовича, однако это не вполне верно. Так называемый градиентный механизм Я.Б. Зельдовича определяет нестационарное развитие процесса теплового взрыва на фоне неравномерно нагретой среды (внутри очага воспламенения, «горячего пятна») и процесса ускорения пламени этот механизм не касается. По-видимому, автор хотел сказать о так называемом SWACER механизме, предложенном J.H.S. Lee для описания переходного процесса с формированием детонации при реализации околоскритического режима инициирования детонации локализованным источником

энергии. Далее автор говорит также о возникновении неустойчивости «на микроуровне» и о развитии детонации «на микроуровне», но эффекты, о которых говорит автор все же проявляются на макроуровне. Далее при обсуждении результатов работ [61,62] говорится о «формировании областей высокого давления..., стимулирующих ускорение пламени за счет гидродинамической неустойчивости». Это некорректно, так как речь идет уже о финальной стадии развития процесса, когда роль гидродинамической неустойчивости уже не значительна. Фактор гидродинамической неустойчивости вносит значительный вклад только на начальных стадиях развития пламени задолго до перехода в детонацию. В ключе конкретной постановки задачи, решенной в рамках настоящей диссертации, в первую очередь для развития этого направления уместно рекомендовать автору познакомиться с недавними работами, подготовленными сотрудниками ОИВТ РАН: [10.1016/j.combustflame.2019.03.012, 10.1016/j.combustflame.2020.08.013].

2) В разделе 2.1.4 диссертации автор предлагает новый кинетический механизм окисления водорода. Однако, в тексте диссертации не приводятся в явном виде конкретные критерии, которыми автор руководствовался при оценке существующих кинетических механизмов и на основе которых был сделан вывод о необходимости конструирования нового кинетического механизма.

3) В разделе 3.2 автор исследует, в том числе, решение на сходимость, но при этом ограничивается рассмотрением расчетной сетки с минимальным размером ячейки 0.25 мм. Как правило, при решении задачи о распространении детонации используются существенно более подробные расчетные сетки, позволяющие разрешать характерные пространственные масштабы, на которых реализуется экзотермическая реакция горения. В том числе, предположительно, такие более подробные расчеты позволят воспроизвести более точно структуру детонационной волны по сравнению с представленными в диссертации расчетами, где имеет место недооценка пикового давления в точке Неймана.

4) В разделе 4.2 при обсуждении особенностей инициирования детонации в результате фокусировки ударной волны в конусе автор делает замечание о том, что учет модели турбулентности при моделировании оказывает влияние на развитие детонации, обеспечивая лучшее согласие с экспериментом. При этом, крайне важно было бы определить конкретный физический механизм, определяющий этот эффект, успевают ли развиваться турбулентность на масштабах развития детонационного процесса или подсеточные эффекты, моделируемые в рамках традиционных моделей турбулентности, связаны с иными физическими факторами.

5) На полях пространственного распределения параметров среды, широко представленных в третьей главе, можно видеть, что расчеты воспроизводят бифуркацию фронта отраженной ударной волны вблизи боковой стенки ударной трубы. Целесообразно в дополнении к прове-

денным верификационным исследованиям проверить, имеет ли место совпадение расчетов с экспериментальными данными.

б) В тексте диссертации встречаются опечатки, грамматические ошибки, неудачные построения фраз и повторы, но, тем не менее, в целом текст составлен понятным языком.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения широкого класса актуальных задач.

Актуальность работы. Диссертационная работа Стамова Л.И. направлена на решение таких актуальных проблем, как исследование нестационарного развития процессов горения и детонации газовых смесей в условиях динамического воздействия на среду, в частности в условиях отражения и фокусировки ударных волн. С одной стороны полученные автором результаты актуальны для решения задач в области разработки новых энергетических устройств, основанных на процессах горения и детонации, и в том числе для решения задач инициирования детонации. С другой стороны понимание сценариев развития взрыва горючей газообразной смеси имеет первостепенное значение при решении задач взрывобезопасности, направленных на предотвращение негативных последствий развития взрыва на промышленных объектах, работа которых связана с рисками накопления горючих газообразных смесей и их последующего взрыва. Полученные автором результаты ценны для различных технологических отраслей, включая добычу (генерацию), хранение и транспорт горючих газов, и в первую очередь для перспективного направления водородной энергетики (с учетом уделенного в работе внимания именно горению водорода). Разработанный автором вычислительный комплекс, включающий модули ускорения расчетов, построенные на основе технологий использования особенностей архитектуры многопроцессорных вычислительных систем, позволяет решать широкий класс задач горения и детонации газовых смесей, являясь актуальным инструментом для проведения научных исследований и расчетно-теоретического сопровождения опытно-конструкторских работ.

Научная новизна диссертационной работы определяется новыми результатами в области инициирования волн горения и детонации при отражении и фокусировке ударных волн. Автором впервые представлено трехмерное численное моделирование процесса воспламенения при взаимодействии ударной волны с клиновидной и конусовидной мишенью. На основе проведенного расчетно-теоретического исследования и сравнения результатов расчетов с данными натурального эксперимента автором впервые получена интерпретация процесса формирования детонации в результате нестационарного процесса, включающего воспламенение, формирование волны горения и переход горения в детонацию внутри мишени заданной геометрии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные Стамовым Л.И. и представленные в тексте диссертационной работы, дополняют современные научные

представления о развитии воспламенения газообразных смесей в результате взаимодействия ударной волны с профилированной мишенью (клин, конус). Практическую значимость играют разработанные автором диссертационной работы вычислительный комплекс и модули проведения расчетов на многопроцессорных вычислительных системах. Представленные автором результаты указывают на высокую производительность предложенных и реализованных им методик и рекомендуются к использованию при проведении научных поисковых и специализированных расчетов, направленных на расчетно-теоретическое сопровождение опытно-конструкторских работ. Полученные результаты по динамике волн горения и детонации, формируемых в результате воспламенения газообразной смеси в области фокусировки ударной волны, являются принципиальными для проектирования перспективных энергетических устройств, включая детонационные двигатели, и для разработки систем предотвращения последствий взрывов газа на промышленных объектах, работа которых связана с рисками выброса горючих газовых компонент в воздух и последующим взрывом. Все указанные задачи являются первостепенными в соответствующих технологических отраслях двигателе- и моторостроения, пожаро- и взрывобезопасности. Отдельно следует отметить, что разработанные автором методики расчета и полученные результаты относятся к горению водородно-воздушных смесей, представляющих особый интерес согласно плану мероприятий по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года, утвержденному 12.10.2020 г. Распоряжением Правительства РФ № 2634. Предложенные и реализованные автором методики расчета многомерных задач горения и взрыва, а так же ряд новых физических результатов могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с горением и детонацией газа и исследуемых в таких научных центрах как ОИВТ РАН, ЦИАМ, ЦАГИ, ИБРАЭ РАН, ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, ИПХФ РАН, ИТПМ СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, НИЦ Курчатовский институт, а также в опытно-конструкторских организациях в составе ОДК.

Достоверность полученных автором результатов и выводов определяется использованием при построении моделей фундаментальных законов, верификацией и валидацией разработанного программного комплекса с применением теоретических и экспериментальных данных, согласованностью полученных результатов с известными в настоящее время сведениями о предмете исследования.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

Публикации. Результаты работы изложены в 39 научных работах, в том числе 5 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 статьях в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Личный вклад автора правильно и полно отражён в диссертации и автореферате.

Диссертационная работа Стамова Л.И. была заслушана и одобрена на научном семинаре Лаборатории №15.2 Вычислительной физики Объединенного института высоких температур Российской академии наук 16 февраля 2021 г.

Диссертация Стамова Любена Ивановича является законченным научно-квалификационным исследованием. Работа отвечает паспорту научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи математического моделирования неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ, имеющей значение для развития физики горения и взрыва и представляющей новые научно обоснованные технические решения в области численного моделирования с использованием многопроцессорных вычислительных систем. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, согласно пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Стамов Любен Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории №15.2 Вычислительной физики ОИВТ РАН, протокол от 19 апреля 2021 г.

Заведующий лабораторией 15.2
Вычислительной физики ОИВТ РАН
кандидат физико-математических наук

Киверин Алексей Дмитриевич

Подпись Киверина А.Д. заверяю
Ученый секретарь ОИВТ РАН д.ф.-м.н.

Амиров Равиль Хабибулович

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

Сайт организации: <https://www.jiht.ru>.

Электронная почта: ofpetrov@ihed.ras.ru.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИВТРАН

125412, Москва
ул. Ижорская, 13, стр. 2
Телефон: (495) 485-83-45
Факс: (495) 485-99-22

19.04.2021 № 11402 - 15.2 - 2171,1

На № _____

Председателю диссертационного совета Д 002.024.03
по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук
на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
академику Б.Н. Четверушкину

Уважаемый Борис Николаевич!

Настоящим Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук направляет в Ваш адрес отзыв ведущей организации на диссертацию Стамова Любена Ивановича на тему: «Математическое моделирование неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и принятую к защите Вашим диссертационным советом.

Приложение:

1. Отзыв ведущей организации, 6 стр., 2 экз.

Зам. директора ОИВТ РАН

А.В. Гавриков